第46卷　第5期
2023年5月

干旱区地理
ARID　LAND　GEOGRAPHY

Vol. 46　No. 5
May　2023

新疆焉耆盆地农田耗水有效性评价

杨一飞[1,2]，　杨鹏年[1,2]，　汪昌树[3]，　寇　鑫[4]，
谭　翻[1,2]，　徐　杰[1,2]，　王　翠[1,2]

（1. 新疆农业大学水利与土木工程学院，新疆 乌鲁木齐　830052；2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室，新疆 乌鲁木齐　830052；3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司，湖北 武汉　841314；4. 焉耆县水利局，新疆 焉耆　841199）

摘　要：西北干旱地区受监测资料匮乏等因素，难以实现区域尺度的水资源消耗效用评价。使用MODIS遥感数据驱动混合双源梯形蒸散发模型（HTEM），对焉耆盆地陆面蒸散发的时空过程进行了连续模拟，并对灌区耗水量进行有效性评价。结果表明：（1）2013—2020年焉耆盆地灌区多年平均蒸散发为624.4 mm，其中作物生育期4—10月蒸散发占全年的89.6%。（2）焉耆盆地灌区植被蒸腾与土壤蒸发多年平均分别为508.9 mm和115.5 mm，各占总蒸散发的81.5%和18.5%。（3）焉耆盆地灌区多年平均蒸散发耗水量13.82×10^8 m^3，其中高效、中效和低效耗水分别占总耗水量的81.5%、5.6%和12.9%，且耗水有效性与植被覆盖度密切相关。在区域尺度以时空连续的方式揭示了焉耆盆地灌区蒸散发水分消耗的有效性，可为干旱区水资源管控提供可靠的理论依据。

关 键 词：蒸散发；HTEM模型；耗水有效性；焉耆盆地

文章编号：1000－6060(2023)05－0730－12(0730～0741)

在西北干旱与半干旱地区的水循环中，蒸散发是水量消耗的主要途径[1]，其主要由植被蒸腾与土壤蒸发构成。就水资源的消耗量而言，超过60%的水量用于农业，其中绝大部分又以农田灌溉的形式消耗于蒸散发[2]。地处西北典型干旱地区的焉耆盆地，是新疆重要的绿洲区，又是重要的经济作物与粮食产区[3]，农业与生态的蒸散发耗水是绿洲内水量消耗的主要方式。随着乡村振兴等一系列重大战略的实施，经济社会高质量发展与生态安全用水之间的矛盾进一步突出，水资源成为焉耆盆地生态保护与经济社会发展的控制性要素。但是，传统意义上的节水主要是针对不同措施执行前后与终端用水的变化量，即实际节约用水的总量[4]，没有对水循环过程中的消耗量进行进一步的划分，仅注重于节水量的大小，而忽视了水资源消耗中的实际效用。因此，探究水资源消耗过程中的利用效率，在水循环过程中有针对性地改进节水措施，对于焉耆盆地集约管理水资源有重要指导意义[5-6]。

国内外学者在蒸散发的理论和实验方面开展了大量的研究[7]，随着卫星遥感技术的迅猛发展，以能量平衡为基础的遥感蒸散发模型已逐渐成为大尺度陆面蒸散发模拟估算的主流方法[8-11]。代表性模型有单源的SEBAL模型[12]、SEBS模型[13]、METRIC模型[14]等；双源的TSEB模型[15]、STSEB模型[16]等；以及构建特征空间的TTME模型[17]和HTEM模型[18]等。虽然单源模型在内蒙古河套灌区、开孔河流域等干旱地区的应用中已取得较好的结果[19-20]，但由于其不能实现植被蒸腾与土壤蒸发的分离，故在评价基于蒸散发耗水的有效性时存在一定的局限性。HTEM模型混合了双源模型“层状”和“块状”的能量分配方法，通过构建地表温度-植被指数特征空间，实现了陆面蒸散发模拟估算及其组分植被

收稿日期：2022-08-19；　**修订日期：**2022-10-11
基金项目：国家自然科学基金-新疆联合基金（U2003105）；新疆维吾尔自治区塔里木河流域管理局项目（TGJJG-2020KYXM0002）资助
作者简介：杨一飞（1998-），男，硕士研究生，主要从事水文及水资源研究. E-mail: yangyf21@yeah.net
通讯作者：杨鹏年（1966-），男，博士，教授，主要从事水文及水资源研究. E-mail: ypn10@163.com

蒸腾与土壤蒸发的分离，能更好地反映植被特征对蒸散发的影响，更适用于干旱与半干旱地区植被非均匀、非完全覆盖的下垫面[8,10]。该模型在美国爱荷华州中部、黑河流域和内蒙古河套灌区等应用结果中表明，其模拟估算结果相较于MOD16产品数据、SEBAL、SEBS等单源模型以及TSEB、TTME等双源模型有更高的精度，并且能够较好地分离植被蒸腾与土壤蒸发[18,21-24]。

焉耆盆地受监测站点稀疏、实测资料匮乏等因素限制，使得以蒸散发为基础的水分利用效率评估还仅局限于站点和灌区尺度[2]。本研究采用高时间分辨率和中空间分辨率的MODIS数据，构建混合双源梯形蒸散发(HTEM)模型，实现了焉耆盆地日尺度的陆面蒸散发及其分量植被蒸腾与土壤蒸发的时空连续模拟，并对盆地内农田蒸散发耗水进行有效性评价，为当地基于蒸散发的水资源管理提供依据[5]。

1 研究区概况

焉耆盆地(85°47′~87°32′E，41°45′~42°29′N)是塔里木盆地东北部的一个半封闭山间盆地(图1)，盆地平原面积(不含博斯腾湖)约为5436 km²，行政区域包括焉耆县、博湖县、和静县、和硕县和新疆生产建设兵团第二师的21团、22团、223团、24团、25团和27团6个团场。研究区深居内陆，地处南北疆气候交错带，属典型大陆性干旱气候。主要气候特点为：冬季严寒，12月—次年2月日平均气温均处于0 ℃以下；春季气温回升迅速，4月日平均气温可从10 ℃以下迅速上升至20 ℃以上；夏季气候温和，日平均气温20~30 ℃；秋季气温下降快。焉耆盆地还具有降雨量小、日照时间长、昼夜温差大、蒸发强烈等典型的干旱区绿洲特征[3]。区内土地利用结构主要包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地，分别占研究区总面积的41.0%、0.1%、10.6%、0.6%、2.5%和45.2%。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究数据主要包括MODIS数据、DEM数据、气象资料、土地利用数据及引水量数据(表1)。其中，遥感卫星数据选取MODIS系列产品：MOD09GA、MOD09GQ和MOD11A1(表2)，采用谷歌数据引擎(Google Earth Engine，GEE)对3种MODIS产品数据进行重采样、掩膜、投影变换等处理，空间分辨率统一为250 m。DEM数据与土地利用数据也经过重采样处理将空间分辨率统一至与MODIS数据相同的250 m分辨率。

2.2 研究方法

本文通过地表能量平衡原理结合地表温度-植被指数特征空间构建HTEM模型，利用MODIS数据驱动模型，实现对陆面蒸散发的模拟估算及其组分

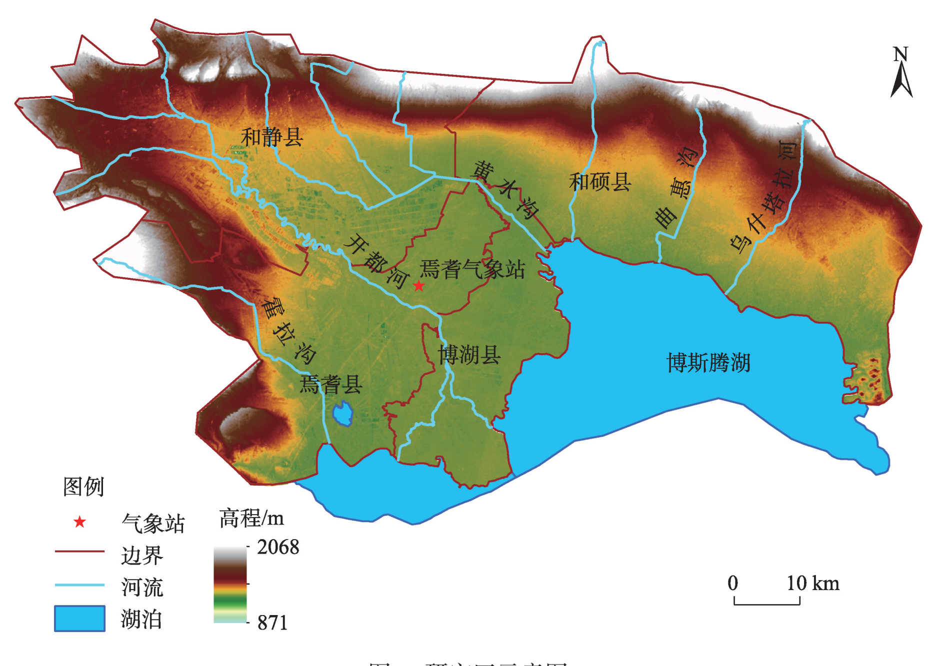


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

表1 主要数据类型及来源

Tab. 1 Main data types and sources

数据名称	时间分辨率	空间分辨率	数据来源	数据类型
MODIS数据	逐日	250 m	美国国家航空航天局(NASA)	MOD09GA、MOD09GQ和MOD11A1
DEM数据	–	30 m	中国科学院地理空间数据云	GDEMV2数字高程数据
气象资料	逐日	站点	中国气象科学数据中心中国地面气候资料数据集	焉耆县气象站气温、风速、湿度、降水量和蒸发量等数据
土地利用数据	逐年	30 m	中国科学院地理科学与资源研究所	一级分类数据
引水量数据	逐年	–	塔里木河流域巴音郭楞蒙古自治州管理局	区域引水量、出流量等数据

注:"–"表示无数据。

表2 MODIS数据产品介绍

Tab. 2 Introduction of MODIS data product

产品名称	时间分辨率/d	空间分辨率/m	波段	波段效果	轨道序列号
MOD09GA	1	500	1~7	地表反射率	h23v04、h24v04
MOD09GQ	1	250	1~2	地表反射率	h23v04、h24v04
MOD11A1	1	1000	1	地表温度	h23v04、h24v04

植被蒸腾与土壤蒸发的分离,得出基于蒸散发的耗水有效性评价。

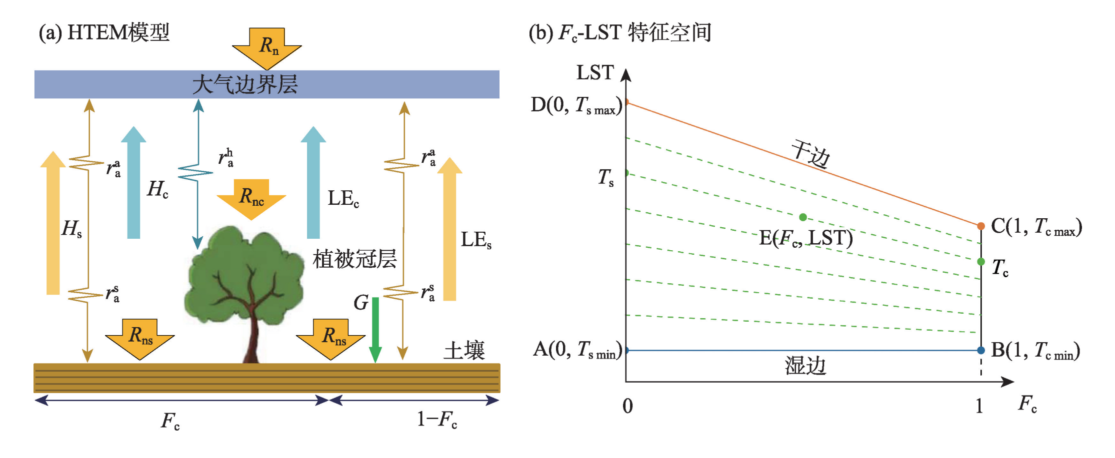
2.2.1 HTEM模型 HTEM模型由2个模块组成。第1个模块是划分每个像元的可用能量,并使用混合双源方案估计表面能量通量(图2a);第2个模块是基于理论确定的梯形特征空间将地表温度(LST)分解为分量温度(图2b)。

在基于地表能量平衡原理的模型中,蒸散发过程消耗的能量可表示为地表能量平衡方程的残差:

$$\mathrm{LE}=R_n-G-H \quad (1)$$

式中:LE为蒸散发消耗的潜热通量($\mathrm{W\cdot m^{-2}}$);R_n为地表净辐射通量($\mathrm{W\cdot m^{-2}}$);G为土壤热通量($\mathrm{W\cdot m^{-2}}$);H为感热通量($\mathrm{W\cdot m^{-2}}$)。

HTEM模型中混合"层状"与"块状"的能量分配方法[18],先采用"层状"方法将地表净辐射通量分配为冠层分量和土壤分量;然后采用"块状"方法将可用能量分配为土壤热通量、感热通量和潜热通量。该方法可分别计算植被覆盖区域与裸土区域的蒸发量,适用于植被稀疏的干旱与半干旱地区,并且对处于播种时期的农田有较高的精确度[8]。



注:HTEM模型为混合双源梯形蒸散发模型;R_n为地表净辐射通量;R_{nc}、R_{ns}分别为冠层、土壤净辐射通量;G为土壤热通量;H_c、H_s分别为冠层、土壤感热通量;LE$_c$、LE$_s$分别为冠层、土壤潜热通量;r_a^h为冠层和参考高度之间的空气动力阻力;r_a^s为紧靠土壤表面的边界层中的空气动力阻力;r_a^a为冠层粗糙度长度和零位移高度之和与参考高度之间的空气动力阻力;F_c为植被覆盖度;LST为地表温度;T_c、T_s分别为冠层、土壤温度;A、D分别为裸地区蒸发速率最小、最大的点;B、C分别为全植被区蒸发速率最小、最大的点;E为特征空间内任意一点。下同。

图2 HTEM模型和F_c-LST特征空间示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of HTEM model and F_c-LST feature space

$$LE = F_c LE_c + (1 - F_c) LE_s \tag{2}$$

$$F_c LE_c = R_{nc} - F_c \rho C_p \frac{T_c - T_a}{r_a^h} \tag{3}$$

$$(1 - F_c) LE_s = R_{ns} - G - (1 - F_c) \rho C_p \frac{T_s - T_a}{r_a^a + r_a^s} \tag{4}$$

式中：LE_c 和 LE_s 分别为冠层潜热通量和土壤潜热通量(W·m^{-2})；R_{nc} 和 R_{ns} 分别为冠层净辐射通量和土壤净辐射通量(W·m^{-2})；F_c 是由归一化植被指数计算得到的植被覆盖度分数[17]；ρ 为空气密度(kg·m^{-3})；C_p 为恒压空气比热容(J·kg^{-1}·K^{-1})；T_c、T_s 和 T_a 分别为植被冠层温度、土壤表面温度和平均气温(K)；r_a^h 为冠层和参考高度之间的空气动力阻力(s·m^{-1})；r_a^s 为紧靠土壤表面的边界层中的空气动力阻力(s·m^{-1})；r_a^a 为冠层粗糙度长度和零位移高度之和与参考高度之间的空气动力阻力(s·m^{-1})；空气动力阻力根据Sánchez等[16]的方法计算。

为了求解潜热通量，需要获得植被冠层温度和土壤表面温度，HTEM模型通过构建梯形 F_c-LST特征空间[17]将地表温度分解为植被冠层温度和土壤表面温度(图2b)。该方法假设空间内存在代表土壤水分状况和蒸发速率的4个理想极值点A、B、C、D，这4个极值点构成了一个梯形空间。点A、B分别代表裸地区和全植被区的非水份胁迫点，AB线被称为湿边，其蒸发速率为0；点C、D分别代表全植被区和裸地区的完全干燥点，CD线被称为干边，蒸发速率为其潜在速率。对于湿边，其最大的蒸发速率对应最低的感热通量，因此将平均气温视为梯形特征空间的湿边。在干边和湿边之间，由梯形空间包围的倾斜线代表土壤湿度等值线[25]，任意一条等值线可以通过线性插值干边和湿边的斜率来获得。在一定的气象条件和地表特征条件下，将冠层潜热通量设为0，可得到理论植被全覆盖地(点C)的温度($T_{c\max}$，K)；同理，将土壤潜热通量设为0，可得到理论最干燥裸地(点D)的温度($T_{s\max}$，K)；最后，植被冠层温度和土壤表面温度可根据各等值线斜率由下式计算得到：

$$T_c = \left[\frac{LST^4 - (1 - F_c) T_s^4}{F_c}\right]^{1/4} \tag{5}$$

$$T_s = \frac{F_c (LST - T_a)(T_{s\max} - T_{c\max})}{(1 - F_c)(T_{s\max} - T_{c\max}) + T_{c\max} - T_a} + LST \tag{6}$$

2.2.2　蒸散发时间尺度扩展　根据卫星遥感只能在卫星重访时提供地表信息，需要将这些瞬时蒸散发(ET_{inst}，mm)扩展为日值蒸散发[26]。在HTEM模型中，假设参考蒸发比(F_{ET})在一天中是一个常数[14]：

$$F_{ET} = \frac{ET_{inst}}{ET_{rinst}} \tag{7}$$

$$ET_{day} = F_{ET} \times ET_{rday} \tag{8}$$

式中：ET_{rinst} 为卫星成像时间的瞬时参考作物蒸散发(mm)；ET_{rday} 为图像当天的累计24 h参考作物蒸散发(mm)，使用联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations，FAO)推荐的Penman-Monteith(P-M)公式[27]计算；ET_{day} 为每日蒸散发(mm)。由于云层遮蔽、影像缺失等因素，导致遥感数据并不是每日连续的，对于缺少遥感数据的时段，参考蒸发比可以通过在邻近的2个有遥感数据的日间进行线性差值获得[28]。

2.2.3　耗水有效性评价指标　本文基于王浩等[5]提出的土壤水资源消耗效用评价指标，结合涂晨雨等[2]的方法将蒸散发过程中消耗的水量定义为3个部分：(1) 将植被蒸腾定义为高效耗水，这部分耗水直接参与了植物干物质的形成，对于作物生产非常重要；(2) 将植物棵间蒸发(土壤蒸发中植被覆盖度高于零的部分)定义为中效耗水，这部分耗水虽然未直接参与干物质形成，但可对植物生长小气候起调节作用从而影响作物的产量，相比于植被蒸腾利用效率较低；(3) 将难以利用的土壤蒸发(土壤蒸发中植被覆盖度接近于0的部分)定义为低效耗水，这部分耗水在地表没有植被覆盖情况下产生，尽管能对周围的生态环境起到一定的作用，但其被利用的可能性甚微。利用上述3个评价指标对焉耆盆地农田耗水进行有效性评价。

2.2.4　HTEM模型验证　为了验证HTEM模型模拟估算陆面蒸散发结果的可信度，需要对估算结果进行检验，虽现已有MOD16A2、PML-V2等多种遥感蒸散发产品，但由于其在干旱与半干旱地区存在数据缺失、结果偏低等因素，导致用于流域尺度时存在较大的局限性[10,29-30]。因此，本研究根据前人的研究经验[31-32]，分别在站点尺度和区域尺度上对HTEM模型的结果进行精度分析。站点尺度使用2种方法进行验证：一是使用气象站大型蒸发器的逐日观测蒸发量乘以折算系数[33]转换为大水面蒸发量，算得4—10月各月日均蒸发量与HTEM模型模拟结果提

取的水面蒸发作为对比；二是使用FAO推荐的P-M公式，选取多种参考作物通过面积加权，计算出盆地农田范围内参考作物4—10月各月日均实际蒸散发，与HTEM模型结果作为对比[32]。区域尺度使用水量平衡方程计算出区域蒸散发作为对比，区域水量平衡方程[34]如下：

$$W_{ET} = W_P + W_D - W_R - \Delta W \quad (9)$$

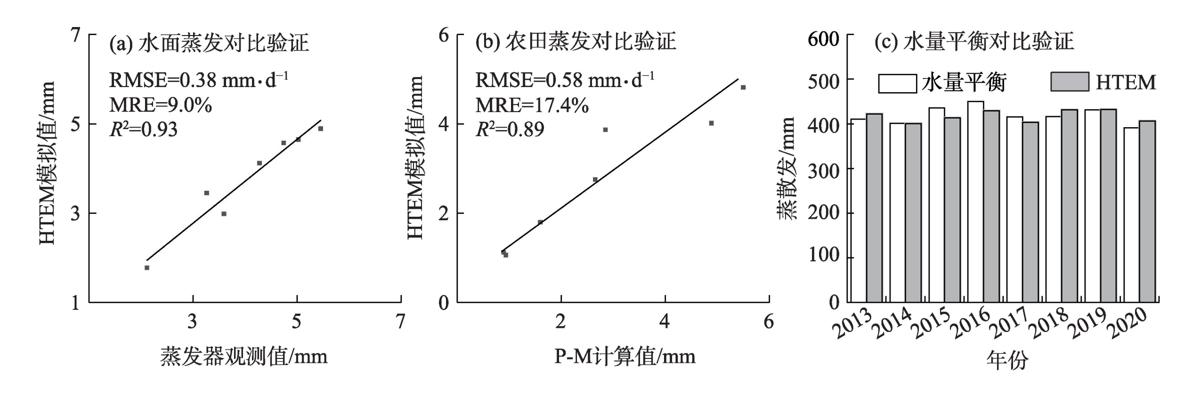
$$ET_W = W_{ET}/A \quad (10)$$

式中：W_{ET} 为水量平衡法计算的区域年总蒸散发量(m^3)；W_P 为区域年降水量(m^3)；W_D 为区域年引水量(m^3)；W_R 为区域年出流水量(m^3)；ΔW 为区域年储水变化量(m^3)，对于年均衡来说 $\Delta W \approx 0$[35]；ET_W 为水量平衡法计算的区域年平均蒸散发量(10^3 mm)；A 为研究区面积(m^2)。

3 结果与分析

3.1 蒸散发模拟精度评价

站点尺度与区域尺度对比结果如图3所示。在站点尺度上(图3a~b)，HTEM模型模拟结果与大型蒸发器观测值对比结果的均方根误差(RMSE)为0.38 mm·d^{-1}，平均相对误差(MRE)为9.0%，决定系数(R^2)为0.93；与P-M公式计算结果对比的RMSE为0.58 mm·d^{-1}，MRE为17.4%，R^2为0.89。在区域尺度上(图3c)，HTEM模型与水量平衡计算结果对比的RMSE为14.7 mm，MRE为3.8%。模型模拟误差范围与其他学者检验结果相近[31-32,36]，误差处于合理范围内，说明HTEM模型在焉耆盆地的适用性较好，可以用于后续蒸散发时空格局分析。



注：RMSE为均方根误差；MRE为平均相对误差；R^2为决定系数；P-M为Penman-Monteith。

图3 HTEM模型点尺度与区域尺度对比验证结果

Fig. 3 Comparison and validation results at point scale and regional scale of HTEM model

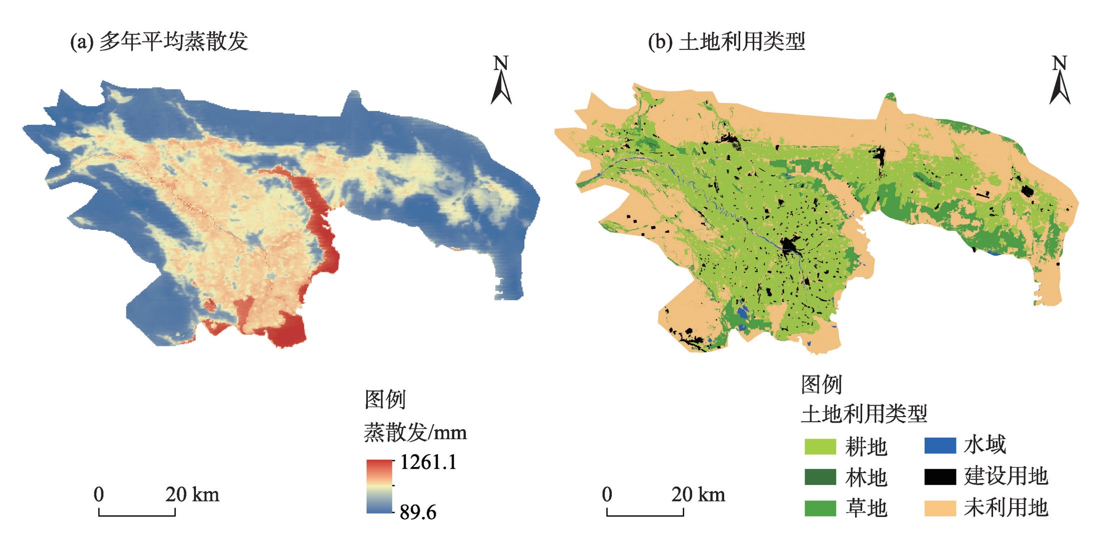


图4 焉耆盆地多年平均蒸散发及土地利用类型空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of multi-year average evapotranspiration and land use types in the Yanqi Basin

3.2　蒸散发时空分布特征

由焉耆盆地蒸散发的空间分布及土地利用类型图(图4)可以看出,蒸散发在空间分布上存在明显的差异,高值主要集中在盆地中部的耕地、水域以及博斯腾湖附近的湿地等区域,由于距离水域较近,加上灌溉等活动,使得下垫面供水较为充足,所以导致蒸散发偏高;低值主要集中在盆地四周的山前平原区及戈壁滩周围等区域,由于降水量少、太阳辐射较高,使得下垫面供水不足,所以导致蒸散发偏低。

为评估农田水分利用效率,本研究对农田范围进行提取分析。2013—2020年焉耆盆地农田蒸散发年际和月际变化趋势如图5所示。盆地农田的年蒸散发在570~660 mm之间浮动变化,多年平均蒸散发为624.4 mm。从年际变化看,8 a内盆地农田的蒸散发总体呈现增加趋势。从月际变化看,多年来年内的变化趋势大体相同,均呈现单峰型,1—7月蒸散发持续增加,于7月达到最高值,之后逐渐减少,至12月达到最低值。总体上看,4—10月是盆地农田蒸散发的集中期,也正是盆地作物的生育期,这7个月的蒸散发占全年蒸散发的89.6%。

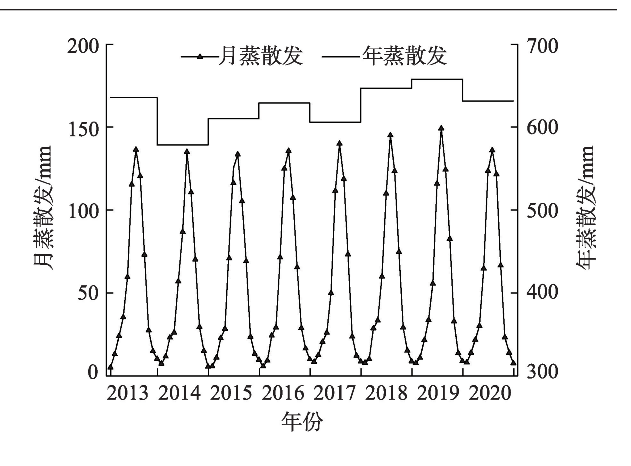


图5　2013—2020年焉耆盆地农田蒸散发年际和月际变化趋势

Fig. 5　Interannual and intermonthly trends of evapotranspiration in agricultural land of Yanqi Basin from 2013 to 2020

3.3　农田植被蒸腾与土壤蒸发分项评价

由焉耆盆地植被蒸腾与土壤蒸发空间分布以及两者分别占总蒸散发的比例分布(图6)可以看出,植被蒸腾主要分布在盆地中部的耕地、林地、草地等有植被覆盖的区域;而土壤蒸发的空间分布趋势与植被蒸腾相反,高值主要分布在未利用地、建设用地等无植被覆盖的区域,低值主要分布在耕地、林地、草地等有植被覆盖的区域。从植被蒸腾与土壤蒸发占蒸散发的比例分布可以看出,植被蒸腾占比在0~92%之间变动,土壤蒸发占比在8%~100%之间变动,两者变化呈相反趋势,互补效应显

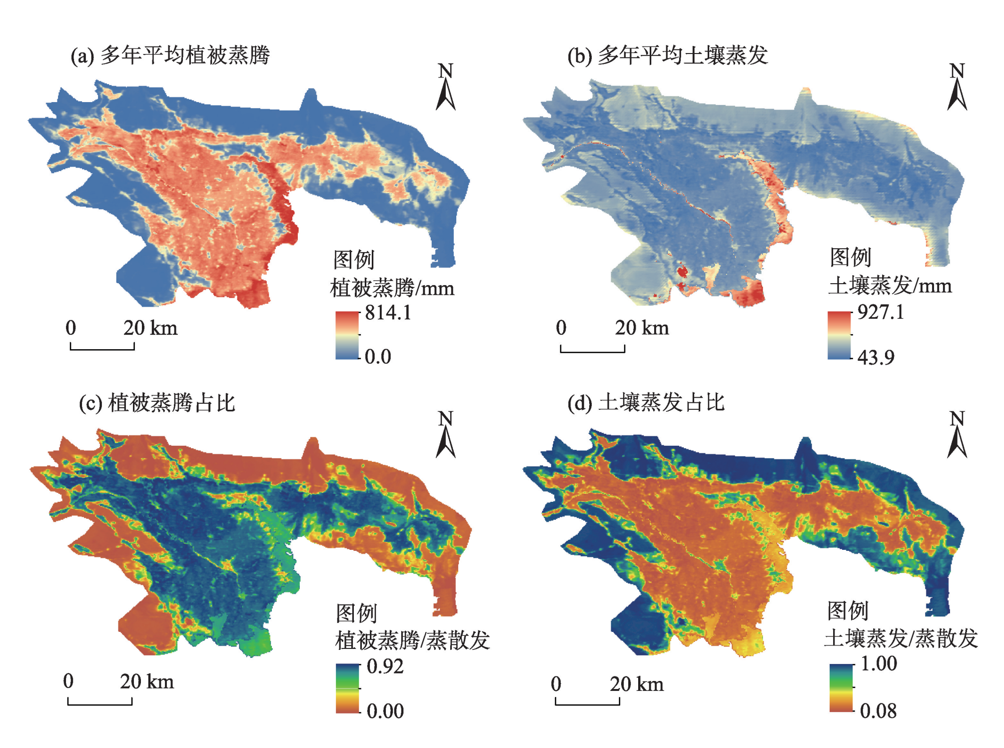


图6　焉耆盆地植被蒸腾与土壤蒸发空间分布及占比

Fig. 6　Spatial distributions and proportions of vegetation transpiration and soil evaporation in the Yanqi Basin

著，且均与植被分布有着密切的联系。

2013—2020年焉耆盆地农田植被蒸腾与土壤蒸发年际和月际变化趋势如图7所示。其中，植被蒸腾多年平均值为508.9 mm，占总蒸散发的81.5%；土壤蒸发多年平均值为115.5 mm，占总蒸散发的18.5%。

从年际变化看，农田植被蒸腾呈现增加趋势；土壤蒸发呈现先减小后增大趋势。从月际变化看，结合焉耆盆地农田多年平均植被蒸腾、土壤蒸发与植被覆盖度时间变化趋势（图8）可以看出，植被蒸腾年内变化趋势与植被覆盖度变化趋势一致，呈单峰型；1—4月农田没有植物，植被蒸腾变化趋于平缓；4月开始植物进入生育期，随辐射和温度的上升，植被蒸腾与植被覆盖度快速增加，于每年7月达到最高值；之后逐渐减少，于12月达到最低值。而土壤蒸发与植被蒸腾的变化趋势相反，呈双峰型，冬季温度低于零度，土壤处于冻结状态，土壤蒸发较小；进入3月以后，随着辐射的增强和温度的升高，土壤开始解冻，土面蒸发逐渐升高，于4月达到第1个峰值；后随着作物生长发育，裸露地表逐渐被植被覆盖，土壤蒸发逐渐减小，于7—9月达到最低

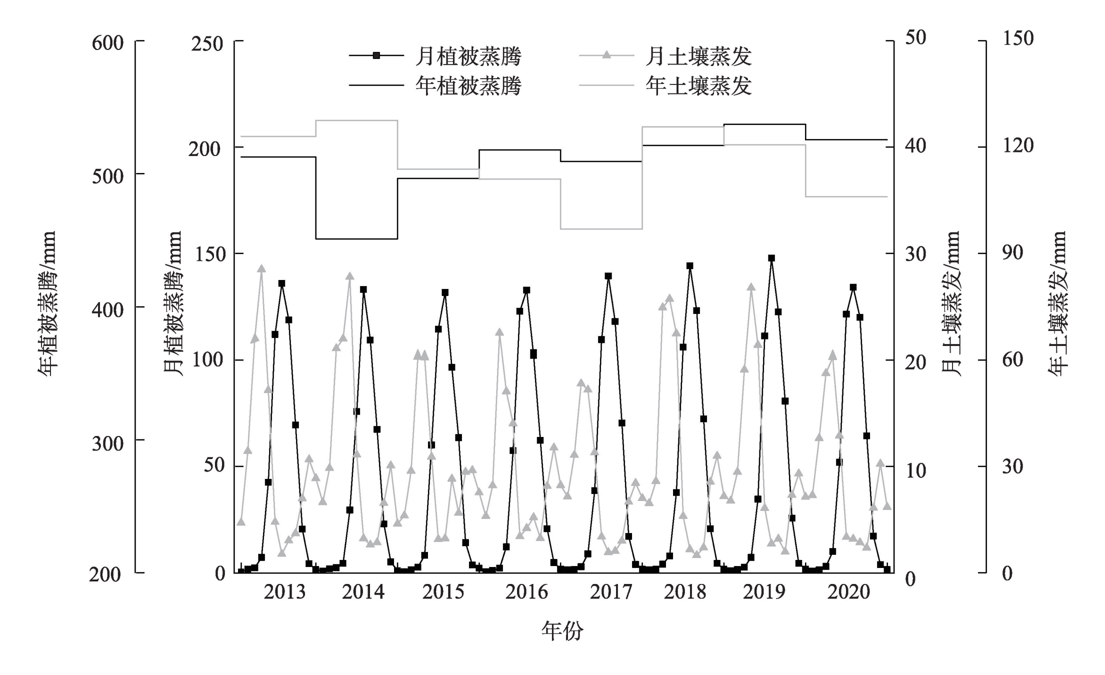


图7 2013—2020年焉耆盆地农田植被蒸腾与土壤蒸发年际和月际变化趋势

Fig. 7 Interannual and intermonthly trends of vegetation transpiration and soil evaporation in agricultural land of Yanqi Basin from 2013 to 2020

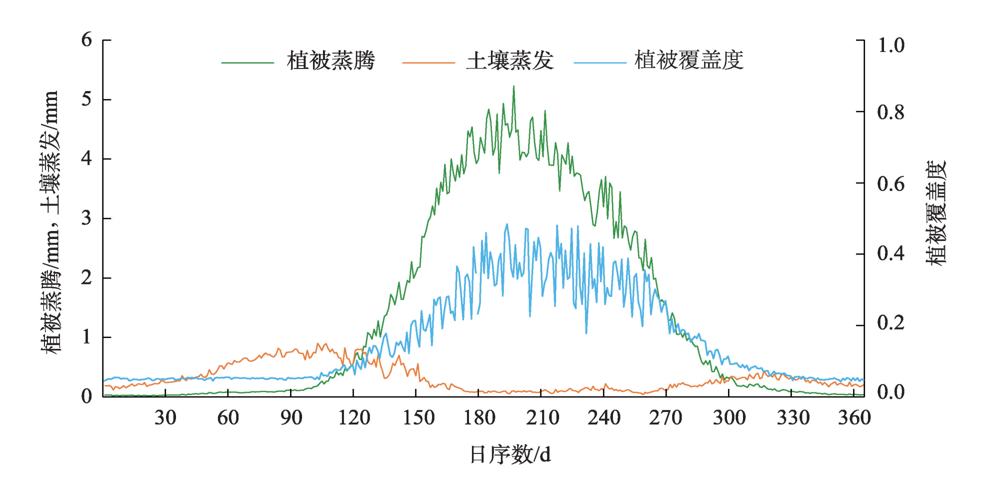


图8 焉耆盆地农田多年平均植被蒸腾、土壤蒸发与植被覆盖度时间变化趋势

Fig. 8 Temporal trends in multi-year average vegetation transpiration, soil evaporation and vegetation cover time in agricultural land of Yanqi Basin

值并且变化趋于平缓；之后由于收割作物导致地表再次裸露，加上焉耆盆地传统的冬灌，土壤蒸发随之增加，于11月达到第2个峰值。

3.4　农田耗水有效性评价

根据王浩等[5]提出的土壤水资源消耗效用评价指标，对2013—2020年焉耆盆地农田耗水有效性进行评价（表3）。具体来说，盆地农田多年平均耗水总量为13.82×10^8 m^3，RMSE为0.52×10^8 m^3·a^{-1}。其中高效耗水11.27×10^8 m^3，占总耗水量的比重最大，达81.5%，远高于中效和低效耗水；低效耗水1.79×10^8 m^{3}略高于中效耗水0.77×10^8 m^3，二者分别占总耗水量的12.9%和5.6%。高效耗水年际变化与灌区耗水总量年际变化趋势相吻合，而中效、低效耗水与耗水总量年际变化趋势相比存在一定差异。2013—2020年以来随着焉耆盆地节灌率的提高，高效耗水和中效耗水在年际变化上均呈现增加趋势，低效耗水呈现减小趋势，其中中效耗水和低效耗水的变幅较缓，高效耗水的变幅相对显著。

表3　2013—2020年焉耆盆地农田耗水有效性评价统计结果

Tab. 3　Statistical results of water consumption effectiveness evaluation of agricultural land in the Yanqi Basin from 2013 to 2020　/10^8 m^3

年份	高效耗水	中效耗水	低效耗水	总量
2013	11.35	0.74	1.98	14.07
2014	9.98	0.72	2.10	12.81
2015	10.99	0.75	1.77	13.51
2016	11.47	0.79	1.67	13.93
2017	11.27	0.73	1.42	13.42
2018	11.54	0.86	1.92	14.32
2019	11.89	0.89	1.78	14.56
2020	11.64	0.69	1.66	13.98
平均	11.27	0.77	1.79	13.82

焉耆盆地农田多年平均高效、中效、低效耗水量逐月占比情况如图9所示，其中高效耗水占比在11.6%~98.0%之间变动，呈单峰型变化，高值主要集中在作物生育期内，期间随着作物生长发育，植被覆盖度增大，水份利用效率也随之增加；作物生育期占比明显高于非生育期。中效耗水占比在1.3%~27.4%之间变动，呈双峰型变化，耗水占比1—5月显著上升，于5月达到第1个峰值，6—9月迅速下降，后趋于稳定，10—11月持续上升达到第2个高峰；2

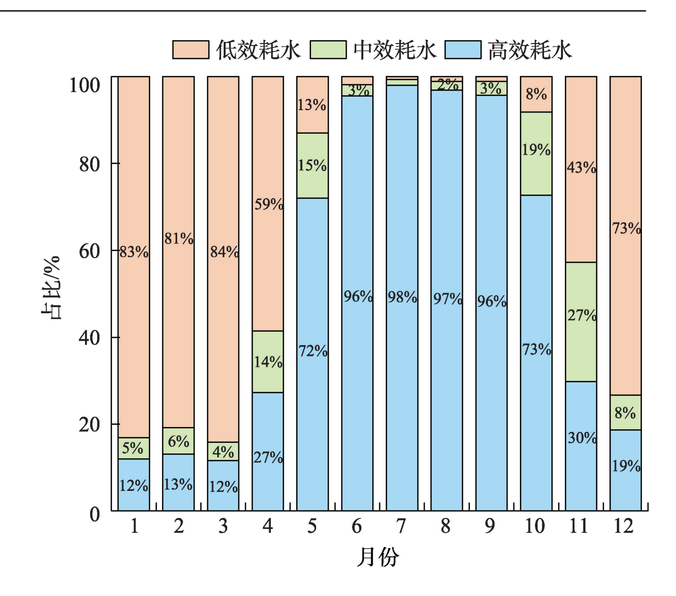


图9　焉耆盆地农田多年平均高效、中效、低效耗水量逐月占比

Fig. 9　Multi-year average monthly proportions of high, medium and low efficiency water consumption on agricultural land in the Yanqi Basin

个峰值分别出现在作物生长发育初期和作物收割期，在此时期植被覆盖度较作物发育中期明显偏低，水分利用效率也随之降低。低效耗水占比在0.7%~84.2%之间变动，呈单谷型变化，与高效耗水占比的变化趋势相反，高值主要集中在作物非生育期，期间由于地表几乎没有植被覆盖，水分利用效率较低；作物非生育期占比明显高于生育期。

4　讨论

4.1　蒸散发模型反演

本研究在站点尺度与区域尺度对HTEM模型模拟结果进行了对比验证，误差均在合理范围内，相应结果与余欣等[36]在开孔河流域的模拟结果相近，证明HTEM模型模拟结果合理，模型在焉耆盆地具有较好的适用性。从模拟结果上看蒸散发的空间分布与土地利用类型具有高度一致性，高值区主要分布在盆地中部的耕地、水域以及博斯腾湖附近的湿地等距离水域较近或有灌溉活动的区域；低值区主要分布在盆地四周的山前地带平原区及戈壁滩周围等缺乏水量补给、下垫面供水不足的区域。这与宁亚洲等[32]对干旱区疏勒河流域的蒸散发模拟结果中水体和植被蒸散发大，而沙地和裸地的蒸散发最小的结论一致。该方法较为准确地模拟蒸散

发，弥补传统方法仅局限于作物生育期模拟的不足，可为基于蒸散发的耗水研究提供更丰富的数据支撑。

4.2 蒸散发耗水有效性评价

本研究将焉耆盆地农田蒸散发消耗的水量，根据其消耗效用分解为高效、中效和低效耗水。从结果来看，近年来焉耆盆地农田平均每年624.4 mm的蒸散发中，土壤蒸发为115.5 mm，占总蒸散发的18.5%，其中80.7 mm属于难以利用的低效耗水，多年平均耗水量达1.79×10^8 m^3，并且主要集中在作物的非生育期，这部分耗水量主要来源于焉耆盆地农田每年冬灌贮存在土壤中的水量。冬灌会将一部分的水量贮存并冻结在土壤中，在春季解冻时较非冬灌地相比土壤含水率有明显提高，具有蓄水保墒与压盐洗盐的作用[37-38]。但是过量且大规模的冬灌不仅导致水分的大量蒸发，增大低效耗水量，而且还造成土壤肥力的流失。随着最严格水资源管理制度的实施，定额供水将成为一种常态化管理措施，大面积的冬灌将难以为继，适度合理的限额冬灌将是今后发展的趋势。因此，在焉耆盆地耕地盐渍化水平持续下降的现状下[39]，可以通过适当减少冬灌面积或增大冬灌周期来缓解农业与生态用水之间的矛盾。

5 结 论

本研究在焉耆盆地监测资料匮乏，难以实现区域尺度上水分利用效率评价的现状基础上，使用MODIS遥感数据驱动HTEM模型，实现区域尺度的蒸散发时空连续模拟及其分量植被蒸腾与土壤蒸发分离，得出了焉耆盆地农田植被蒸腾与土壤蒸发的时空变化特征，并定量评价了灌区蒸散发水分消耗的有效性，可为干旱区水资源管控提供可靠的理论依据。主要结论如下：

（1）2013—2020年焉耆盆地灌区平均蒸散发为624.4 mm，年际变化上总体呈现增加趋势；年内呈单峰型变化，作物生育期4—10月蒸散发占全年蒸散发的89.6%。蒸散发在空间分布上存在明显的差异，受下垫面不同的影响，高值主要集中在盆地中部的耕地、水域以及博斯腾湖附近的湿地等区域，低值主要集中在盆地四周的山前倾斜平原区及戈壁滩周围等区域。

（2）焉耆盆地灌区植被蒸腾与土壤蒸发多年平均值分别为508.9 mm和115.5 mm，各占总蒸散发的81.5%和18.5%。年际变化上植被蒸腾呈现增加趋势；土壤蒸发呈现先减小后增加趋势。植被蒸腾年内变化趋势与植被覆盖度变化趋势一致，呈单峰型，于每年7月达到最高值；土壤蒸发与植被蒸腾的变化整体呈现相反趋势，呈双峰型，分别于4月和11月达到峰值。

（3）焉耆盆地灌区多年平均蒸散发耗水13.82×10^8 m^3，其中高效、中效和低效耗水分别为11.27×10^8 m^3、0.77×10^8 m^3和1.79×10^8 m^3，各占总耗水量的81.5%、5.6%和12.9%，高效耗水总量远大于中效及低效耗水。近年来随着焉耆盆地节灌率的提高，高效耗水和中效耗水量年际变化上呈现增加趋势，低效耗水呈现减小趋势，其中中效耗水和低效耗水的变幅较缓，高效耗水的变幅相对显著。年内高效耗水占比呈单峰型变化，高值主要集中在作物生育期，期间占比明显高于非生育期；中效耗水占比呈双峰型变化，高值主要集中在作物生长发育初期和作物收割期；低效耗水占比呈单谷型变化，与高效耗水占比的变化趋势相反，高值主要集中在作物非生育期，期间占比明显高于生育期。耗水有效性与植被覆盖度密切相关，随植被覆盖度的增大而增大。

参考文献（References）

[1] 周彦昭, 周剑, 李妍, 等. 利用SEBAL和改进的SEBAL模型估算黑河中游戈壁、绿洲的蒸散发[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1526−1537. [Zhou Yanzhao, Zhou Jian, Li Yan, et al. Simulating the evapotranspiration with SEBAL and modified SEBAL (M-SEBAL) models over the desert and oasis of the middle reaches of the Heihe River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(6): 1526−1537.]

[2] 涂晨雨, 贾绍凤, 朱文彬, 等. 柴达木盆地蒸散发遥感估算与耗水有效性评价研究[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5404−5415. [Tu Chenyu, Jia Shaofeng, Zhu Wenbin, et al. Remote sensing estimation of evapotranspiration and efficiency evaluation of water consumption in Qaidam Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5404−5415.]

[3] 李晴, 杨鹏年, 彭亮, 等. 基于MOD16数据的焉耆盆地蒸散量变化研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 351−358. [Li Qing, Yang Pengnian, Peng Liang, et al. Study of the variation trend of evapotranspiration in the Yanqi Basin based on MOD16 data[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 351−358.]

[4] 王浩, 杨贵羽. 二元水循环条件下水资源管理理念的初步探索

[J]. 自然杂志, 2010, 32(3): 130−133. [Wang Hao, Yang Guiyu. Preliminary study on new concept of water resources management under dualistic water cycle condition[J]. Chinese Journal of Nature, 2010, 32(3): 130−133.]

[5] 王浩, 杨贵羽, 贾仰文, 等. 基于区域ET结构的黄河流域土壤水资源消耗效用研究[J]. 中国科学(地球科学), 2007, 37(12): 1643−1652. [Wang Hao, Yang Guiyu, Jia Yangwen, et al. Research on soil water resources consumption utility in the Yellow River Basin based on regional ET structure[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2007, 37(12): 1643−1652.]

[6] 吴炳方, 朱伟伟, 曾红伟, 等. 流域遥感: 内涵与挑战[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 654−673. [Wu Bingfang, Zhu Weiwei, Zeng Hongwei, et al. Watershed remote sensing: Definition and prospective [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 654−673.]

[7] 赵丽雯, 赵文智, 吉喜斌. 西北黑河中游荒漠绿洲农田作物蒸腾与土壤蒸发区分及作物耗水规律[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 1114−1123. [Zhao Liwen, Zhao Wenzhi, Ji Xibin. Division between transpiration and evaporation, and crop water consumption over farmland within oases of the middlestream of Heihe River Basin, northwestern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1114−1123.]

[8] 李晗, 陈晗, 黄津辉, 等. 区域遥感双源蒸散发模型研究进展[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 87−94. [Li Han, Chen Han, Huang Jinhui, et al. Research progress on dual-source evapotranspiration models based on regional remote sensing[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 87−94.]

[9] 唐荣林, 王晟力, 姜亚珍, 等. 基于地表温度——植被指数三角/梯形特征空间的地表蒸散发遥感反演综述[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 65−82. [Tang Ronglin, Wang Shengli, Jiang Yazhen, et al. A review of retrieval of land surface evapotranspiration based on remotely sensed surface temperature versus vegetation index triangular/trapezoidal characteristic space[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 65−82.]

[10] 尚松浩, 蒋磊, 杨雨亭. 基于遥感的农业用水效率评价方法研究进展[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 81−92. [Shang Songhao, Jiang Lei, Yang Yuting. Research progress on evaluation methods of agricultural water use efficiency based on remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 81−92.]

[11] 杨雨亭, 尚松浩. 双源蒸散发模型估算潜在蒸散发量的对比[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 85−91. [Yang Yuting, Shang Songhao. Comparison of dual-source evapotranspiration models in estimating potential evaporation and transpiration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(24): 85−91.]

[12] Sun S K, Li C, Wang Y B, et al. Evaluation of the mechanisms and performances of major satellite-based evapotranspiration models in northwest China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 291: 108056, doi: 10.1016/j.agrformet.2020.108056.

[13] Moletto-Lobos I, Mattar C, Barichivich J. Performance of satellite-based evapotranspiration models in temperate pastures of southern Chile[J]. Water, 2020, 12(12): 3587, doi: 10.3390/w12123587.

[14] Allen R G, Tasumi M, Trezza R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2007, 133(4): 380−394.

[15] Norman J M, Kustas W P, Humes K S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 77(3−4): 263−293.

[16] Sánchez J M, Kustas W P, Caselles V, et al. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3): 1130−1143.

[17] Long D, Singh V P. A two-source trapezoid model for evapotranspiration (TTME) from satellite imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 121: 370−388.

[18] Yang Y, T, Shang S H. A hybrid dual-source scheme and trapezoid framework-based evapotranspiration model (HTEM) using satellite images: Algorithm and model test[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(5): 2284−2300.

[19] 刘馨井雨, 韩旭东, 张晓春, 等. 基于SEBAL模型和环境卫星的区域蒸散发量及灌溉水利用系数估算研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(8): 136−144. [Liu Xinjingyu, Han Xudong, Zhang Xiaochun, et al. Using SEBAL model and HJ satellite data to calculate regional evapotranspiration and irrigation water use efficiency[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(8): 136−144.]

[20] 宋佳. 开都−孔雀河流域天然植被蒸散发遥感反演及生态需水研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019. [Song Jia. Remote sensing retrieval of natural vegetation evapotranspiration and ecological water requirement in Kaidu-Kongqi River Basin[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2019.]

[21] 蒋磊, 尚松浩, 杨雨亭, 等. 基于遥感蒸散发的区域作物估产方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 90−97. [Jiang Lei, Shang Songhao, Yang Yuting, et al. Method of regional crop yield estimation based on remote sensing evapotranspiration model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (14): 90−97.]

[22] Yang Y T, Long D, Guan H, et al. Comparison of three dual-source remote sensing evapotranspiration models during the MUSOEXE−12 campaign: Revisit of model physics[J]. Water Resources Research, 2015, 51(5): 3145−3165.

[23] Yang Y T. Evapotranspiration over heterogeneous vegetated surfaces[M]. Berlin: Springer, 2015.

[24] Yu B, Shang S H, Zhu W B, et al. Mapping daily evapotranspiration over a large irrigation district from MODIS data using a novel hybrid dual-source coupling model[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 276: 107612, doi: 10.1016/j.agrformet.2019.06.011.

[25] Yu B, Shang S H. Estimating growing season evapotranspiration and transpiration of major crops over a large irrigation district from HJ-1A/1B data using a remote sensing: Based dual source evapotranspiration model[J]. Remote Sensing, 2020, 12(5): 865, doi: 10.3390/rs12050865.

[26] Xu T, Liu S, Xu L, et al. Temporal upscaling and reconstruction of thermal remotely sensed instantaneous evapotranspiration[J]. Remote Sensing, 2015, 7(3): 3400-3425.

[27] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: Food and Agriculture Organization (FAO), 1998.

[28] Bastiaanssen W G M, Ahmad M D, Chemin Y. Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin[J]. Water Resources Research, 2002, 38(12): 9-1-9-9, doi: 10.1029/2001WR000386.

[29] 潘子豪, 杨胜天, 娄和震, 等. 缺测站干旱流域生态输水遥感监测与农业节水效益分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 774-785. [Pan Zihao, Yang Shengtian, Lou Hezhen, et al. Remote sensing monitoring of ecological water conveyance and benefits evaluation of agricultural water-saving in arid basin without observation station[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 774-785.]

[30] 张圆, 贾贞贞, 刘绍民, 等. 遥感估算地表蒸散发真实性检验研究进展[J]. 遥感学报, 2020, 24(8): 975-999. [Zhang Yuan, Jia Zhenzhen, Liu Shaomin, et al. Advances in validation of remotely sensed land surface evapotranspiration[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(8): 975-999.]

[31] 李旭亮, 杨礼箫, 胥学峰, 等. 基于SEBAL模型的西北农牧交错带生长季蒸散发估算及变化特征分析[J]. 生态学报, 2020, 40(7): 2175-2185. [Li Xuliang, Yang Lixiao, Xu Xuefeng, et al. Analysis of evapotranspiration pattern by SEBAL model during the growing season in the agro-pastoral ecotone in northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(7): 2175-2185.]

[32] 宁亚洲, 张福平, 冯起, 等. 基于SEBAL模型的疏勒河流域蒸散发估算与灌溉效率评价[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 928-938. [Ning Yazhou, Zhang Fuping, Feng Qi, et al. Estimation of evapotranspiration in Shule River Basin based on SEBAL model and evaluation on irrigation efficiency[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 928-938.]

[33] 钟新才. 博斯腾湖水面蒸发量初步估算[J]. 干旱区地理, 1988, 11(4): 39-44. [Zhong Xincai. Primary evaluation of water surface evaporation in Bosten Lake[J]. Arid Land Geography, 1988, 11(4): 39-44.]

[34] 卢诗卉, 赵红莉, 蒋云钟, 等. 基于多源遥感数据和水量平衡原理的灌溉用水量分析[J]. 水利学报, 2021, 52(9): 1126-1135. [Lu Shihui, Zhao Hongli, Jiang Yunzhong, et al. Analysis of irrigation water based on multi-source remote sensing data and water balance principle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(9): 1126-1135.]

[35] 李晴. 基于遥感蒸散量的焉耆盆地农田水量平衡方程建立及应用[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021. [Li Qing. Establishment and application of farmland water balance equation based on remote sensing evapotranspiration in Yanqi Basin[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021.]

[36] 余欣, 杨汉波, 吕华芳, 等. 基于广义蒸发互补理论的塔里木河流域绿洲实际蒸散发变化及其归因分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(6): 1-9. [Yu Xin, Yang Hanbo, Lü Huafang, et al. Generalized evapotranspiration-complementarity theory-based analysis on variation of actual evapotranspiration in oases of Tarim River Basin and its attribution[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(6): 1-9.]

[37] 张瀚, 杨鹏年, 汪昌树, 等. 干旱区不同冬灌定额对土壤水盐分布的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(11): 42-46. [Zhang Han, Yang Pengnian, Wang Changshu, et al. Effect of winter irrigation amount on soil moisture and salt distribution in arid area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(11): 42-46.]

[38] 刘函如, 冯进平, 刘洪光. 周期性冬灌对新疆膜下滴灌棉田盐分和经济效益的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(6): 194-201. [Liu Hanru, Feng Jinping, Liu Hongguang. Effect of periodic winter irrigation on salinity and economic benefit of cotton field under mulched drip irrigation in Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(6): 194-201.]

[39] 杨强军, 范燕敏, 耿庆龙, 等. 焉耆盆地耕地土壤盐分时空变化特征研究[J]. 新疆农业大学学报, 2020, 43(5): 385-390. [Yang Qiangjun, Fan Yanmin, Geng Qinglong, et al. Temporal and spatial variation characteristics of soil salinity in cultivated land of Yanqi Basin[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2020, 43(5): 385-390.]

Effectiveness evaluation of water consumption in agricultural land of Yanqi Basin, Xinjiang

YANG Yifei[1,2], YANG Pengnian[1,2], WANG Changshu[3], KOU Xin[4], TAN Fan[1,2], XU Jie[1,2], WANG Cui[1,2]

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjang, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, Xinjang, China; 3. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 841314, Hubei, China; 4. Yanqi County Water Conservancy Bureau, Yanqi 841199, Xinjiang, China)

Abstract: It is difficult to evaluate the water resource consumption effectiveness at a regional scale in the arid northwest due to the lack of monitoring information and other factors. This paper uses the MODIS remote sensing data to drive a hybrid dual-source trapezoidal evapotranspiration model (HTEM), to continuously simulate the spatiotemporal processes of land surface evapotranspiration in the Yanqi Basin of Xinjiang, China, and to evaluate the effectiveness of water consumption in irrigation areas. The following results were obtained: (1) The multiyear average evapotranspiration in the irrigation area of Yanqi Basin from 2013 to 2020 is 624.4 mm, of which the evapotranspiration from April to October during the crop fertility period accounts for 89.6% of the year. (2) The multiyear average of vegetation evapotranspiration and soil evaporation in the irrigation area is 508.9 mm and 115.5 mm, respectively, accounting for 81.5% and 18.5% of the total evapotranspiration. (3) The multiyear average evapotranspiration water consumption in the irrigation area was 13.82×10^8 m^3, of which high-, medium-, and low-efficiency water consumption accounted for 81.5%, 5.6% and 12.9% of the total water consumption, respectively, and the effectiveness of water consumption was closely related to the vegetation cover. This study reveals the effectiveness of evapotranspiration water consumption in irrigation areas on a regional scale with a spatiotemporal continuum, which can provide a reliable theoretical basis for water resource control in arid zones.

Key words: evapotranspiration; hybrid dual-source trapezoidal evapotranspiration model (HTEM); water consumption effectiveness; Yanqi Basin